

# KKS im Stahlbetonbau – Kontrolle der Ausführung und Inbetriebnahme – Erfahrungen in der Praxis

Felix Wenk  
Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz

## **Zusammenfassung**

Der kathodische Korrosionsschutz im Stahlbetonbau (KKS) hat sich in den letzten 15 Jahren in Deutschland zunehmend durchgesetzt, insbesondere bei der Instandsetzung von Parkhäusern. Die Vorteile hinsichtlich hoher Dauerhaftigkeit, geringer Emissionen, kurzer Installationsdauer und minimalen Eingriffs in die bestehende Tragstruktur sind für seine Wahl vielfach entscheidend. Für die große Akzeptanz des Instandsetzungsverfahrens sorgen zudem die Norm DIN EN ISO 12696 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton und die einschlägigen Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. In der Norm sind die Kontrollen betreffend die Ausführung und die Inbetriebnahme detailliert beschrieben. Es fehlen jedoch die Erfahrungen aus der Praxis sowie die typischen Projektbeispiele. Denn auch beim KKS gilt, dass die Funktionstauglichkeit, die Wirksamkeit und die Dauerhaftigkeit der Erhaltungsmaßnahme neben den Materialeigenschaften auch von der Qualität der Ausführung abhängen.

## 1. Ausführungskontrollen

### 1.1 Norm

In der Norm DIN EN ISO 12696:2016 [1] werden in den Kapiteln 5, 6 und 7 die erforderlichen Eigenschaften an die Materialien und Komponenten beim KKS-B und die durchzuführenden Kontrollen betreffend die Ausführung beschrieben. Letztere umfassen im Wesentlichen visuelle und mechanische Kontrollen sowie messtechnische Prüfungen bezüglich des elektrischen Stromdurchgangs, der Anschlusseigenschaften an Anoden und Kathoden und der Ausbreitungswiderstände von Anoden und Bezugselektroden.

### 1.2 Praxis

In der Praxis zeigt sich, dass das Fehlerpotential in allen genannten Bereichen groß sein kann. Eine entsprechende Eigenüberwachung der Arbeiten ist daher zwingend und Stichprobenkontrollen durch externe Sachverständige sind zu empfehlen.

Bei der visuellen Kontrolle ist zum einen die Übereinstimmung von Plänen und Ausführung zu prüfen. In der Regel wird die definitive Lage der Bezugselektroden erst basierend auf der in der Ausführung erfolgten Potentialmessung festgelegt. Auch die Anschlüsse an Anoden und Kathoden können sich in der Ausführung noch ändern. Manchmal kommen noch weitere, in der Projektierung noch nicht vorgesehene Bauteile und Schutzzonen dazu. Die Ausführungspläne sind entsprechend zu aktualisieren. Es empfiehlt sich, bei den Kontrollgängen auch die Mörtelpaletten zu begutachten (Abb. 1.1) und die Produkte mit der Zustimmung im Einzelfall zu vergleichen. Das Mörtelprodukt hat ja bekanntlich einen entscheidenden Einfluss auf die Funktionsfähigkeit von KKS-B.



Abb. 1.1 Mörtelpalette

Eine visuelle Begutachtung ist auch bezüglich Untergrundvorbereitung und Nachbehandlung vorzunehmen. Mängel und Schäden beim KKS-B sind oft auf eine

ungenügende Haftung des Einbettungsmörtels auf dem Untergrund sowie auf kapillares Schwinden infolge nicht ausreichender oder fehlender Nachbehandlung der Mörteloberflächen zurückzuführen. Für eine optimale Haftung wird eine Untergrundrauheit von ca. 3 mm angestrebt (Abb. 1.2) [2]. Sandstrahlen ist als Untergrundvorbereitung oftmals ungenügend. Junger Mörtel schwindet, nicht jedoch der bestehende Untergrund. Temperaturgradienten oder hygri-sche Beanspruchungen führen zu zusätzlichen Verbundspannungen zwischen alten und neuen Schichten. Neben ausreichender Rauigkeit ist auch auf eine genügende Vorbehandlung zu achten, damit der Originalbeton dem Mörtel keine für die Hydratation erforderliche Feuchtigkeit entzieht und dass keine Staub- oder Schmutzfilme den Verbund beeinträchtigen. Ebenfalls wichtig ist die Abstimmung der Elastizitätsmoduln von Einbettungsmörtel und Untergrund. Zu harte Mörtel erhöhen das Risiko von Abschalungen. Neben der visuellen Kontrolle werden zur Prüfung des Verbundes auch Haftzugfestigkeitsmessungen empfohlen.



Abb. 1.2 Ungenügende Rauigkeit im Sockelbereich

Um die Kurzschlussgefahr zu minimieren, ist eine genügende Distanz zwischen Anoden und Kathoden einzuhalten. In der Regel ist ein Mindestabstand von 15 mm vorgesehen [1]. Bei großen Flächen eignet sich zur Messung der Überdeckung aus Effizienzgründen das Georadarverfahren (Abb. 1.3).

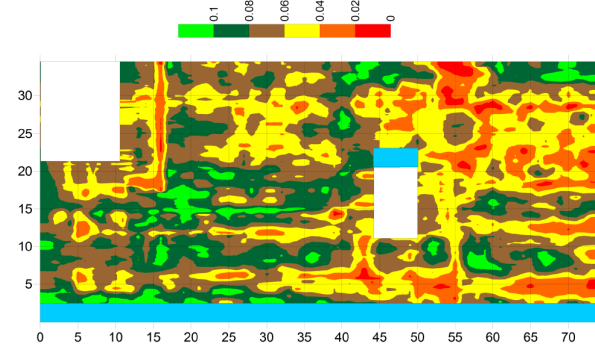


Abb. 1.3 Messung der Bewehrungsüberdeckung

Werden die Anodenbänder in Schlitze verlegt, ist eine vorgängige Bestimmung der Bewehrungsüberdeckung

ein Muss, da sonst tragsicherheitsrelevante Querschnittsverluste auftreten können (Abb. 1.4).

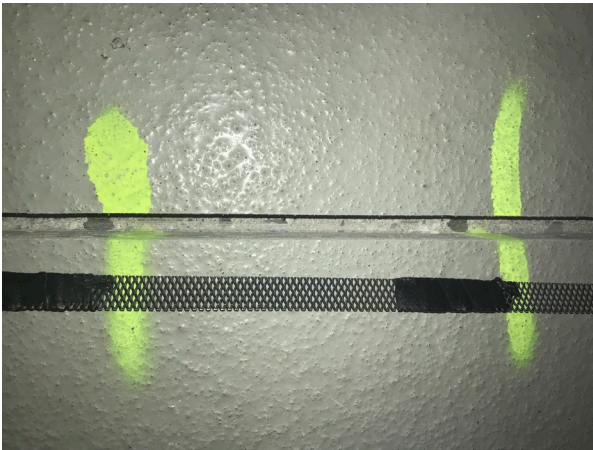


Abb. 1.4 Angeschnittene Bewehrung in Schlitzen

Bei der Schlitzvariante ist darauf zu achten, dass die Einbettung mit einem möglichst schwindkompensierten Mörtel erfolgt respektive das darauffolgende Beschichtungssystem in ausreichender Schichtstärke appliziert wird, damit keine sichtbaren Rillen entstehen (Abb. 1.5).



Abb. 1.5 Eingeschlitzte Anoden

Die verwendeten Anoden sind bezüglich Hersteller, Bandbreiten, Netzweiten, Schichtstärken/Mengenverbrauch etc. zu prüfen.

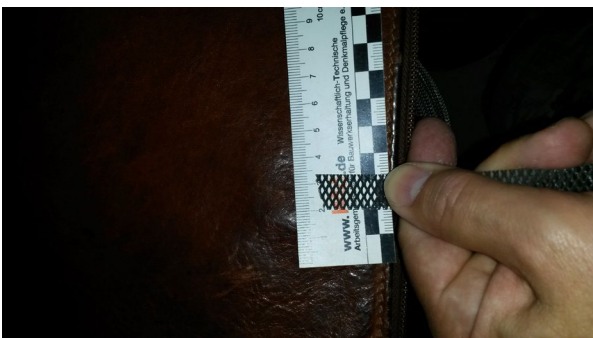


Abb. 1.6 Kontrolle der Titanbandbreite

Die Anschlüsse an Anoden und Bewehrung sind nicht nur visuell zu prüfen, sondern auch mechanisch von Hand. Zur fachgerechten Fixation der Anodenbänder- und -netze ist auf eine ausreichende Zahl von Kunststoffbefestigern zu achten. Die Anodenanschlüsse sind zudem einwandfrei elektrisch zu isolieren, damit kein anodischer Stromaustritt die Anschlüsse schädigt.



Abb. 1.7 Punktschweißung zwischen Primär- und Sekundäranode (Quelle: sakks GmbH, Schlier-Oberankenreute)

Um zu verhindern, dass der Einbettungsmörtel frühzeitig austrocknet und der Widerstand im Gesamtstromkreislauf stark ansteigt, ist die erforderliche Anodenüberdeckung, in der Regel mindestens 15 mm, zu überprüfen.

Damit Bewehrungsstäbe und im Beton eingebaute metallische Strukturen kathodisch geschützt werden und keine Gefahr bezüglich schädigender anodischer Beeinflussung besteht, ist ein elektrischer Stromdurchgang unabdingbar. Dazu muss zwischen den Bewehrungsstäben oder metallischen Einbauten eine Gleichstromwiderstandsmessung mit anschließender Polaritätsumkehr der Prüfleitungen oder eine Messung der Potentialdifferenz nach Gleichstrompolarisation durchgeführt werden. Die Abnahmekriterien sind stabile Messwerte und ein Widerstand von weniger als  $1,0 \Omega$  [1].

KORROSIONSSCHUTZ			
Projektname TG PAPPANAVEG 2	Messprotokoll 011	Datum 11/15/18	PR-KKs
Projektnummer A18_002	Durchleitende Verbindung der Bewehrung	Seite 1	

Der elektrische Widerstand zwischen zwei Punkten muss weniger als 1,0 Ohm betragen.  
DIN EN ISO 12696 Kapitel 5.7

Messpunkt	Schutzzone	DC Widerstand (Ohm)		DC Spannung (mV)	Genehmigt (Ja/Nein)
		Vorwärts	Rückwärts		
S21 K1 / S21 K2	ALLE S21	0,1 $\Omega$	0,1 $\Omega$	0,0 mV	JA
1 S21 K3		0,1 $\Omega$	0,1 $\Omega$	0,0 mV	JA
1 S21 K4		0,1 $\Omega$	0,1 $\Omega$	0,0 mV	JA
1 S21 K5		0,1 $\Omega$	0,1 $\Omega$	0,0 mV	JA

Abb. 1.8 Eigenüberwachung elektrischer Stromdurchgang (Quelle: PR-KKs GmbH, Nürnberg)





Wird das Einschaltpotential positiver anstatt negativer, muss beim Anschluss an die Gleichstromquelle nicht unbedingt Anode und Kathode vertauscht worden sein. Wenn nur an einzelnen Messstellen eine Polarisation in falscher Richtung erfolgt, ist auch zu kontrollieren, ob die Bezugs Elektroden und die stromlosen Bewehrungsanschlüsse korrekt an die Messmodule angeschlossen sind.

## 2. Inbetriebnahme

### 2.1 Norm

In der Norm DIN EN ISO 12696:2016 [1] werden im Kapitel 8 die erforderlichen Kontrollen im Rahmen der Inbetriebnahme aufgeführt. Dazu gehören die Sichtprüfung, die Messungen vor der Stromeinspeisung, die anfängliche Stromeinspeisung inkl. Einregelung und Leistungsbeurteilung sowie die dazugehörigen Schutzkriterien.

### 2.2 Praxis

Nach Abschluss der Arbeiten können im Rahmen der Inbetriebnahme nur noch beschränkt Sichtprüfungen durchgeführt werden. Anoden, Anschlüsse und Bezugs Elektroden sind im Betonuntergrund oder im Einbettungsmörtel eingebaut. Visuell einsehbar sind hauptsächlich noch das Schutzstromgerät, die Verteiler- und die Messmodul Dosen sowie die Kabeltrassen.



Abb. 1.14 Schutzstromgerät für 19 Schutz zonen



Abb. 1.15 Messmodul dosen für zwei Schutz zonen (Quelle: sakks GmbH, Schlier-Oberankenreute)

Im Gegensatz zur konventionellen Instandsetzung mittels Betonabtrag und -ersatz können Mängel dank Monitoring relativ einfach entdeckt werden.

Wichtig für die Beurteilung der Funktionstauglichkeit und Wirksamkeit der Anlage ist die Messung der Bewehrungspotentiale vor der Stromeinspeisung, die sogenannten Ruhepotentiale. Deren Werte hängen u. a. von der Betonfeuchtigkeit ab. Sie werden mit zunehmender Austrocknung des Betons positiver und sollten daher nicht zu früh erfasst werden. Ebenfalls zu dokumentieren ist die Potentialdifferenz zwischen Bewehrung und Anode. Bei eingebauten Makrozellsensoren sind die Korrosionsströme festzuhalten. Die von Hand gemessenen Werte sollen dabei mit denjenigen der elektronischen Datenerfassung übereinstimmen.

QM-Blatt 4 KONTROLLE MESSPROBEN

Projektname	City Parkling	Prüfender	COG / BHP	Vermessende Messgeräte	Rel 201 LC2
Projektnummer	800 343 2	Prüfdatum		Unterschrift des Prüfenden	<i>[Signature]</i>
Projektleiter	EHP	Prüfzeit			
Bemerkungen					
Hinweis / Nachbühnenzeit / Beschreibung des Zustands (z.B. Fehler Körnung etc.)					
Wichtig: Wird eine Messung als ungenügend beurteilt sind die daraus resultierenden Maßnahmen festzuhalten.					
Messstelle	Messgröße (-Anschluß)	Bezugselektrode (-Anschluß)	AC-Widerstand	DC-Spannungsdifferenz	DC-Stromfluß
			gegen Ref	gegen Ref	→ XAF → MP Wert 1 24h nach Einbau Stopp (mA)
Ref	(Ref)	(Ref)	(Ref)	(Ref)	Strom 3 C-Messung Polarisation (mA)
Zone 1	MC 12.1	Ref 32.1	5,7 kΩ	717 mV	-241
Zone 2	MC 12.2	Ref 32.2	6,1 kΩ	1,8 kΩ	-522 mV
					-50 µA

Abb. 1.16 Korrosionsströme bei Makrozellsensoren (Quelle: suicorr AG, Zürich-Dietikon)

Für die Beurteilung der Ausführungsqualität sowie für die Festlegung der Schutzspannungen empfiehlt es sich, vor der Stromeinspeisung die Ausbreitungswiderstände der Anoden zu messen und mit den projektierten Werten zu vergleichen. Insbesondere bei den Diskretanoden kann auf diese Weise die hohlstellenfreie Ankoppelung an den Originalbeton geprüft werden. Spätestens dann zeigt sich auch, ob die geplanten Schutzstromdichten in der erforderlichen Homogenität und bei üblichen Treibspannungen erreicht werden können. In den Leistungsverzeichnissen sind diese Prüfungen mit Vorteil zu positionieren, da sie nicht explizit in der Norm aufgeführt sind.

Bei der Inbetriebnahme soll gemäß Norm erst 10 % bis 20 % des Bemessungsstroms eingespeisen werden [1]. Die Stromdichten liegen dann in der Regel zwischen 2 bis 4 mA/m<sup>2</sup> und die Schutzspannungen betragen oft

deutlich weniger als 2 Volt. Da sehr hohe Chloridgehalte oft nur in Rissbereichen auftreten, reichen diese Einstellungen meistens für den größeren Teil der zu schützenden Bewehrung aus. Bei Diskretanoden sind vielfach Treibspannungen von über 4 Volt erforderlich, da aus wirtschaftlichen Gründen deren Anzahl möglichst klein gehalten wird. Für eine dauerhafte Anwendung sollte gemäß FORCE Technology 5 Volt nicht überschritten werden [3].

Die anfängliche Stromspeisung soll nicht bei allen Schutzzonen gleichzeitig, sondern nacheinander erfolgen. Durch diese Vorgehensweise können Beeinflussungen in respektive aus angrenzenden Zonen festgestellt und erklärt werden, insbesondere auch beim Verlauf der Depolarisation. Ebenfalls erkannt wird, wenn ein Anodenanschluss oder eine Bezugsselektrode einer falschen Schutzzone zugeordnet wurde. Im ersten Fall unterscheidet sich in der Regel der berechnete Schutzstrom deutlich vom gemessenen und die im Anodenbereich liegenden Referenzelektroden zeigen beispielsweise unerklärlicherweise ein Einschaltpotential an. Falls eine Bezugsselektrode falsch angeschlossen ist, reagiert sie z.B. nicht auf die Stromspeisung.

Die für eine ausreichende Wirksamkeit erforderliche Schutzstromdichte hängt u.a. vom Chloridgehalt ab. Ein erster Hinweis kann das Einschaltpotential geben. Ist es mehr als 200 mV negativer als das Ruhepotential, kann eine vollständige Schutzwirkung vorliegen [1].

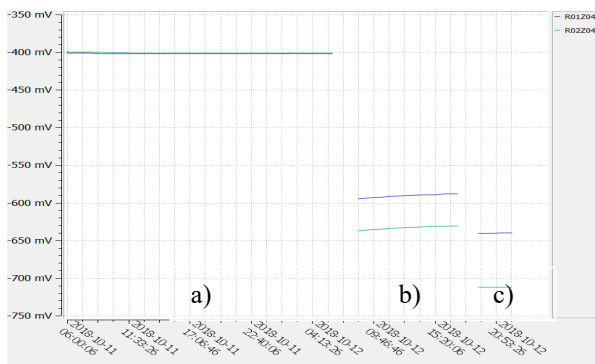


Abb. 1.17 Ruhepotentiale (a), Einschaltpotentiale bei 1.2 Volt (b) und 1.5 Volt (c) Schutzspannung (Quelle: iCOR GmbH, Mönchengladbach)

Hilfreich ist auch der Einsatz von Makrozellensensoren, die spezifisch auf den Zustand des Objekts bestimmte Chloridgehalte aufweisen. Gemessene Stromeintritte bestätigen die Schutzwirkung.

Makrozellensensor Nr.	Ruhepotential [mV <sub>Msoz</sub> ]	Korrosionsstrom [mA/m <sup>2</sup> ]	Einschaltpotential [mV <sub>Msoz</sub> ]	Schutzstrom [mA/m <sup>2</sup> ]
1	-241	+1.5	-760	+1.3
2	-527	-50.0	-680	+1.1
3	-420	-30.0	-550	+1.3
4	-269	-2.0	-580	+2.7

5	-209	-1.0	-610	+4.4
6	-285	-0.5	-510	+1.0

Abb. 1.18 Potentiale und Ströme bei Makrozellensensoren (Quelle: suicorr AG, Zürich-Dietikon)

Bereiche mit höheren Chloridgehalten weisen infolge des geringeren elektrischen Widerstandes höhere Schutzstromdichten auf. Die Depolarisation fällt allerdings an diesen Stellen oft geringer aus, da die eintretenden Ströme für einen ausreichenden Potentialanstieg zu klein sind. Die kathodische Teilreaktion an der Bewehrung führt zu einer lokalen Erhöhung des pH-Wertes. Ein tendenziell positiveres Ausschaltpotential ist die Folge und bestätigt die Wirkung des KKS. Dieser Effekt ist bei Bewehrung mit negativeren Ruhepotentialen oft stärker als bei derjenigen mit positiveren Ruhepotentialen (Abb. 1.19).

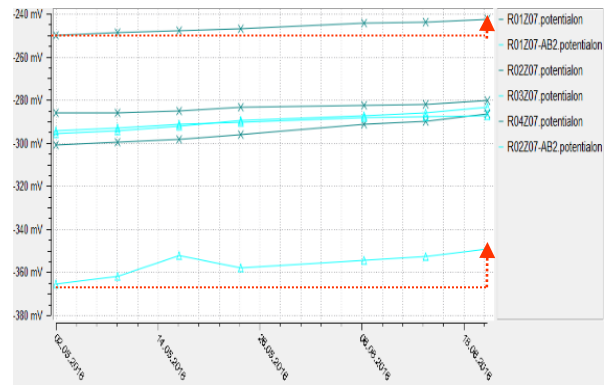


Abb. 1.19 Zeitlicher Verlauf der Ausschaltpotentiale nach 24 Stunden (Quelle: iCOR GmbH, Mönchengladbach)

Bei Schutzzonen mit höheren Chloridgehalten ist die Versuchung groß, die Spannung am Gleichrichter so zu erhöhen, damit möglichst schnell das normkonforme Schutzkriterium erreicht wird. Man nimmt dafür relativ hohe Schutzstromdichten in Kauf. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass größere Stromdichten als die Bemessungsstromdichten von 15 – 20 mA/m<sup>2</sup> zu lokalen Mörtelschäden um die Bewehrung infolge Ansäuerung führen können [4]. Besser ist es, die sekundären Schutzmechanismen beim KKS – die Erhöhung des pH-Wertes sowie die Verringerung der Chloridkonzentration in der unmittelbaren Umgebung der Bewehrung über längere Zeit wirken zu lassen, bevor eine Schutzstromanpassung vorgenommen wird [5]. Die Norm sieht im ersten Betriebsjahr eine monatliche Prüfung der Funktion und eine Leistungsbeurteilung im Abstand von drei Monaten vor [1]. Eine Erhöhung des Schutzstroms muss bei nicht Erreichen des Schutzkriteriums nicht zwingend vorgenommen werden, wenn Indizien wie das kontinuierliche Ansteigen des Ausschaltpotentials nach z.B. 24 Stunden respektive Erfahrungswerte betreffend Einschaltpotential oder Schutzstromdichten vorliegen, die das Einhalten der

Kriterien nach Ablauf der Einregelungsphase nahelegen.

### **Quellenverzeichnis**

- [1] Deutsche Norm DIN EN ISO 12696 Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, 2016
- [2] Instandhaltungs-Richtlinie DAfStb, Gelbdruck 2016-06-14
- [3] Technisches Datenblatt der durAnode4-Diskretanode von FORCE Technology
- [4] R. Müller, K. Holtzhauer, Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen – Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln, ASB Brückenunterhaltsforschung, 1992
- [5] Th. Eichler, Zu den sekundären Schutzmechanismen beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in alkalischen Medien, Dissertation, 2012

Anschrift:

Hochschule für Technik Rapperswil  
Prof. dipl. Ing. Felix Wenk  
Oberseestrasse 10  
8640 Rapperswil  
Schweiz  
felix.wenk@hsr.ch